

# 第 1 章

## 绪 论

### 1. 物理实验课程的重要性和任务

物理学是一门以实验为基础的学科,是所有理工科专业的理论基础。大学物理实验是理工科院校学生受益面最广的基础实验课程,也是学生接受系统实验方法和实验技能训练的开端,在培养学生的实践动手能力、系统思维能力和工程意识等方面具有非常重要的作用。

在现代科学技术高度发展的今天,物理实验的构思、方法和技术仍在各专业领域得到广泛的应用,对各学科的进一步发展起到了极大的促进作用。《理工科类大学物理实验课程教学基本要求》(2023年版)进一步强化分层次实验教学要求,提倡大学物理实验课程体系结合各专业差异开展因材施教,为不同院校的实验课程在培养专业性人才方面提供了指导性建议。理工科院校的学生毕业后大多从事科学研究和生产技术研究开发工作,经常需要解决科研与生产实际中遇到的各种问题。这些问题往往要通过实验来解决,即使只需从理论出发即可提出解决问题的方法,也常常要先做实验来验证它的可行性。因此,单凭理论知识显然是很不够的,而必须具备一定的实验知识,掌握一系列的实验方法,熟悉并学会使用必要的实验仪器,知道怎样对实验所得的数据进行总结归纳、加工处理,从而找出对解决问题有用的规律与结论,还要懂得怎样计算误差,判断所得规律与结论的可靠性。这就是实验的能力。

物理实验课的目的首先是培养一种严谨求实、理论联系实际科学素养与工作作风,同时也是进行较为系统严格的科学实验方法的学习训练;其次是为今后进行专业实验方法和实验技能的训练打下一个良好的基础。该课程的主要任务有以下几个方面。

(1) 培养学生对实验现象的观察与分析能力,学会运用物理学原理和物理实验方法来研究物理现象,总结物理规律。

(2) 通过实验训练培养与提高学生的科学实验的素质,培养学生实事求是的科学态度、严谨务实的工作作风及相互协作、共同探索的协同精神。

(3) 培养与提高学生科学实验工作的综合能力,包括自学能力、动手能力、客观观察与思维判断能力、表达书写能力及初步的实验设计能力。

### 2. 物理实验课规则

(1) 实验前必须认真预习,按要求写出预习报告,并回答教材上列出的思考题;对于某些一时不知如何回答的问题,要在正式实验的过程中寻找答案。不预习实验或达不到预习

要求者,不准参加该项目的实验。

(2) 应准时到实验室上课。迟到超过学校的规定时间后,不准进行实验。

(3) 应独立完成实验任务,并在实验中积极思考;未经教师同意,不得请他人帮忙,并注意保持实验室安静、整洁。

(4) 进行实验时要按规定的顺序对号入座,不得自行调换仪器。如遇仪器发生故障,应及时报告指导教师。

(5) 操作仪器、连接线路时,必须按有关规程和注意事项进行。因违反规程或违反纪律而损坏仪器者,应填写仪器损坏报告单并按学校规定赔偿。

(6) 实验完毕,必须经指导教师检查数据并签字,然后整理仪器使之恢复到实验前的状态,方可离开实验室。每个实验班应由教师安排值日同学,并在实验结束后清扫实验室。

(7) 按时提交正式实验报告,同时须附上经教师签字的带有原始数据表的预习报告。如未能按时提交,则教师要在记录本次实验报告成绩时酌情扣分。

(8) 无故缺课者不补课。因病因事而缺课者,应持学校规定的请假手续方可安排补课。至学期末,完成的实验个数未达到学校规定数目的学生,不得参加本学期考试,该学期实验成绩按不及格录入。

### 3. 物理实验课的主要教学环节

物理实验课的主要教学环节一般可分为以下三个阶段。

#### 1) 课前的预习

预习要求学生参阅实验教材或有关资料及相关视频课件等,学会归纳出实验原理、方法、实验条件及实验注意事项,把握该实验的实验内容。预习报告中应标明实验名称和实验目的,简要地写出实验原理,列出使用的仪器,概括出实验内容,拟出数据记录表格。书写预习报告时要字迹工整。

#### 2) 实验操作

首先应根据教材或仪器说明书熟悉仪器,在教师指导下学会仪器的正确使用方法,否则,绝不可盲目动手。对照实验原理及内容,明确要测的物理量,弄清先测什么、再测什么、最后测什么、如何测等问题,做到心中有数。

实验中,应集中精力仔细观察,认真思考观察到的物理现象;通过正确读数,及时将采集的实验数据和观察到的现象如实地记录下来,尤其是对所谓的反常现象更要仔细观察和分析,不要单纯追求实验过程“顺利”,要养成对观察到的现象和所测得的数据随时进行判断和记录的习惯;如发现记录的数据有错,不要随意涂改,可在错误的数字上划一条横线(如 12.5)标记,并将正确的数据写在其旁边或补在最后。对实验过程中出现的故障要学会排除。

对两个人或多个人合作的实验,既不要使其中一个人处于被动的状态,也不能一个人包办,应该分工协作、共同参与,从而共同达到预期的实验训练目的。

实验结束后,要将测得的数据交给教师检查,经教师认可实验结果并签字后,才整理实验现场,方可离开实验室。

#### 3) 撰写实验报告

实验报告是实验工作的全面总结,是为了培养、训练学生以书面形式总结工作或报告科研成果的能力。撰写实验报告时,要用简明的形式将实验结果完整而又真实地表达出

来,要求语句通顺、字迹端正、图表规矩、结果正确,最后认真归纳出实验结论。完整的实验报告,通常包括下列部分。

- (1) 实验名称。
- (2) 实验目的。
- (3) 简要的实验原理、计算公式和必要的附图(电路图、光路图或其他示意图)。
- (4) 实验仪器设备(包括其型号)及其主要规格(如量程、精度级别等)。
- (5) 实验内容及必要的步骤、原始数据表。
- (6) 数据处理或计算过程。
- (7) 误差与不确定度的分析或估算(可根据具体实验的要求,做定量、半定量或定性的分析或估算;误差过大时,应分析其原因,并做出合理解释)。
- (8) 完整规范的实验结果表达与明确的实验结论。
- (9) 必要时的简要讨论(可包括实验过程中观察到的异常现象及其可能的解释,也可以是实验仪器设备和实验方法改进的建议等)。
- (10) 对思考题的回答。

## 第 2 章

# 物理实验的基本实验方法

科学实验,是根据一定的目的,运用必要的物质手段,在人为控制条件下,通过观察和测量来研究自然规律的实践活动。每个实验的目的、原理和仪器通常会有所不同,但其所用的研究方法常会有某种共性。我们把那些有某种共性的实验研究方法,称为基本实验方法。物理实验是以测量为基础的,因此物理学中的实验方法,也常常被称为测量方法。学习和掌握这些基本实验方法,不仅有助于理解已有的科学实验,更能为将来自己设计科学实验提供思路。

如果被测量有可用来比较的标准量,可以将被测量与标准量进行比较,而获得被测量的量值(数值+单位),这种实验方法称为比较法。如果被测量太小,难以或无法进行比较,可以先把被测量放大后再进行测量,这种实验方法称为放大法。如果被测量难以或无法直接测量,可以利用被测量与其他易于测量的物理量之间的关系,通过测量那些易于测量的物理量,来获得被测量的量值,这种实验方法称为转换法。如果自然状态或过程难以(或无法)在实验中实现,可以通过将一种易于实现的状态或过程作为模型,来间接研究原自然状态或过程(原型),前提是模型和原型间存在某种等效性,这种实验方法称为模拟法。

几乎每一个实验所用的实验方法,都可以归为以上 4 种基本实验方法中的某一种。在此基础上,一个实验还常常会用到其他典型实验方法。如果能使系统达到某种平衡状态,则可以利用平衡状态时的稳定性,以及偏离平衡状态时的高灵敏度,而使测量的精度更高,这种实验方法称为平衡法。如果某种效应引起的系统变化,能通过相反的效应补偿回来,则可以利用该相反的效应,来消除系统误差,或者获得测量结果,这种实验方法称为补偿法。在一些实验中,这两种实验方法也常常结合使用。例如,用电位差计测量电压时用的实验方法,既是平衡法,也是补偿法;当然,它更是比较法。

### 2.1 比较法

比较法是将相同类型的被测量与标准量进行比较而获得被测量量值的方法。比较法主要有以下两种。

#### 1) 直接比较法

直接比较法是将被测量与标准量直接进行比较而获得被测量量值的方法。例如,用尺子测量长度、用计时器测量时间等都是直接比较法。

## 2) 间接比较法

间接比较法是利用被测量与其他物理量之间的关系,将同类型的被测量与标准量间接进行比较而获得被测量量值的方法。

用安培表按如图 2-1 所示的方法测量电阻,就是一种典型的间接比较法。该方法利用某种等效状态(电阻相等,则电流相等),将被测量(待测电阻)与标准量(标准电阻)间接进行比较而获得被测量的量值,也称为替代法。曹冲称象是典型的替代法。

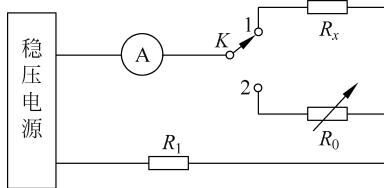


图 2-1 安培表测量电阻的原理

实际上,安培表是利用电流在磁场中所受的安培力,来测量电流大小的。其测量电流的方法,本质上属于转换法(电学量 $\rightarrow$ 力学量)。但因为电流的大小已经用指针的偏转量表示在安培表的表盘上,所以用安培表测量电流时,可以认为是利用指针的偏转量,将电路中的电流(被测量)与标准电流进行了间接比较。因此,用安培表测量电流、用电压表测量电压或用温度计测量温度,以及其他用直读式仪表进行的测量,都可以被看作直读式的间接比较法。

此外,利用电桥平衡法测量电阻、利用共振现象测量振动的频率或利用已知振动与未知振动的频率之比成整数倍时的李萨如图形测量振动的频率,以及其他利用某种特殊现象,将被测量与标准量进行比较的方法,也被看作间接比较法。

## 2.2 放大法

放大法是先将被测量放大后再进行测量的实验方法。放大法主要有以下四种。

### 1) 累计放大法

把量值变化相等的微小量累计后再进行测量的方法,称为累计放大法。例如,测量单摆的周期,可以通过测量 100 个周期的累计时间来测量;测量细丝的直径,可以通过测量密绕 100 匝的总直径来测量。

### 2) 机械放大法

通过某种机械装置把被测量放大后再进行测量的方法,称为机械放大法。例如,螺旋测微计的放大原理是通过螺旋,把沿螺杆轴线方向的微小位移,转变为圆周上一点移动的弧长;指针式仪表的原理是通过指针的长度,把微小的偏转放大到易读的程度。

### 3) 光学放大法

常见的光学放大法有两种。一种是通过光学仪器成像,直接把被测量进行放大,这种方法称为视角放大法。例如,测微目镜、读数显微镜等都是利用这种方法制成的仪器。另一种方法是通过光路的反射,把微小的角度或角度和长度的微小变化,转换为反射光线在标尺上的显著刻度,这种方法称为光杠杆法。例如,用拉伸法测量钢丝的弹性模量时,可以借助一个由平面镜制成的光杠杆来测量钢丝的微小伸长量;在测量旋转液体表面的倾角时,可以利用液面自身反射形成的光杠杆来测量液面的倾角。

### 4) 电子放大法

将微弱电学量(电压、电流等)通过电子电路放大后再进行观察和测量的方法,称为电子放大法。三极管是最常用的电子放大元件。

## 2.3 转换法

转换法是将被测测量转化为某种易于测量的物理量后,再进行测量的实验方法。那些易于测量的物理量,一般可分为如下几类。

### 1) 非电量转换为电学量(电压、电阻、电流等)

它是指利用被测测量与电学量之间的关系,通过测量电学量来获得被测测量的量值。

(1) 力电转换。它是指利用某种效应把力学量转换为电学量。例如,利用具有压电效应的石英晶体、压电陶瓷等可以测量压力。

(2) 热电转换。它是指利用某种效应把热学量转换为电学量。例如,利用热敏电阻可以测量温度。

(3) 磁电转换。它是指利用某种效应把磁学量转换为电学量。例如,利用霍尔效应可以测量磁场。

(4) 光电转换。它是指利用某种效应把光学量转换为电学量。例如,利用光敏电阻测量光强;利用光电效应(光电管)测量光强。

### 2) 被测测量转换为力学量(力、加速度、速度等)

(1) 电力转换。它是指利用被测测量与力学量之间的关系,通过测量力学量来获得被测测量的量值。例如,安培表测量电流强度的方法,就是通过测量电流在磁场中所受的安培力,来获得待测电流的大小。

(2) 力力转换。它是指利用被测力学量与其他力学量之间的关系,通过测量其他力学量来获得被测力学量的量值。例如,用拉脱法测量液体表面张力系数时,利用拉力、重力和表面张力之间的平衡,把对表面张力的测量转换为对拉力和重力的测量。

### 3) 被测测量转换为描述波动特性的物理量

它是指利用被测测量与描述波动特性的物理量之间的关系,通过测量描述波动特性的物理量来获得被测测量的量值。

(1) 反射和折射法。它是指利用波的反射和折射特性来测量物理量。例如,利用超声波的反射和折射现象,可以测量样品的一些固有特性,可以探明样品内部的结构和缺陷分布情况等,从而完成对样品的检测。

(2) 相位比较法。它是指利用相位的特性测量物理量。例如,对波长的测量,可以通过比较在波的传播方向上任意两点的相位来实现,相邻同相点的距离即为波长。

(3) 驻波法。它是指利用驻波的特性测量物理量。例如,利用驻波的波节或波腹位置测量波长。

(4) 干涉法。它是指利用波的干涉特性测量物理量。例如,利用劈尖干涉现象,可以测量纸片的厚度、头发丝的直径等。

(5) 衍射法。它是指利用波的衍射特性测量物理量。例如,利用衍射光栅测量单色光波长;利用激光的衍射测量细丝的直径等。

(6) 偏振法。它是指利用波的偏振特性测量物理量。例如,利用偏振光的旋光现象,测量蔗糖溶液浓度。

(7) 多普勒效应法。它是指利用波的多普勒效应测量物理量。例如,利用超声波或电磁波的多普勒效应,测量物体运动的速度。

## 2.4 模拟法

模拟法是通过将一种易于实现的状态或过程作为模型,来间接研究原自然状态或过程(原型)的实验方法。前提条件是,模型和原型间存在某种等效性。模拟法主要有以下三种。

### 1) 物理模拟

物理模拟是以模型与原型之间的物理相似(或几何相似)为基础的模拟方法,即模型与原型间存在基本相同的物理条件。例如,风洞实验(模拟高速运动物体的动力学环境)、流体力学实验(模拟实物的几何形状)、迈克耳孙干涉仪(模拟薄膜干涉)、示波器(利用电子的运动模拟波动信号)。

### 2) 数学模拟

数学模拟是以模型与原型之间的数学相似为基础的模拟方法,即模型与原型满足数学形式基本相同的方程和边界条件。例如,用恒定电流场模拟静电场的实验(模拟静电场的电势分布)。

### 3) 计算机模拟

计算机模拟是通过运用计算机技术,产生虚拟的模型来再现原型的模拟方法。例如,各类数值模拟实验和虚拟仿真实验。

## 2.5 平衡法

平衡法是利用系统在平衡状态时的稳定性,以及系统偏离平衡状态时的高灵敏度,而使测量的精度更高的实验方法。它主要包括如下几种。

### 1) 力学平衡

它是指利用系统的力学平衡原理测量物理量。例如,用天平称量质量时,杠杆两端力矩相等;用密立根油滴法测量电子电荷时,利用了重力、黏滞力和电场力之间的平衡。

### 2) 电学平衡

它是指利用系统的电学平衡原理测量物理量。例如,用平衡电桥测量电阻时,电桥两端电势相等;用电位差计测量电动势(或电压)时,待测电势差与电位差计输出的电势差相等。

### 3) 热平衡

它是指利用系统的热平衡状态测量物理量。例如,用温度计测量温度时,温度计与被测物体达到热平衡。

### 4) 稳态平衡

它是指利用系统的稳态平衡原理测量物理量。例如,用稳态法测量热导率时,吸热速率与散热速率相等。

## 2.6 补偿法

补偿法是利用引起系统变化的正、反两种效应的相互补偿,来消除(或明显降低)系统误差,或者获得测量结果的实验方法。它主要包括如下几种。

### 1) 光程补偿

在“迈克耳孙干涉仪”实验中,利用迈克耳孙干涉仪中的光程差补偿板,可以补偿其中一路光因反射和折射所产生的光程差。

### 2) 交换补偿

用平衡电桥测量电阻时,交换测量臂与比较臂在电路中的位置进行两次测量,再通过适当的数据处理方法,可以消除因比值不精确而引起的系统误差;用天平称量质量时,交换被称量物和砝码的位置进行两次测量,再通过适当的数据处理方法,可以消除因天平不等臂而引起的系统误差。

### 3) 换向补偿

用霍尔效应测量磁场时,改变电流和磁场的方向进行多次测量,再通过适当的数据处理方法,可以消除因附加电压而引起的系统误差;用拉伸法测量钢丝的弹性模量时,分别通过对钢丝逐步增加外力和逐步减小外力的方法,可以消除因材料的弹性形变滞后效应而引起的系统误差。

### 4) 漏热补偿

用电热法测量液体的比热时,初、末态温度可取为与室温上下对称的温度值,这样当温度在高于室温和低于室温的两个过程中,因漏热引起的系统误差可以相互补偿。

### 5) 电压或电流补偿

用电位差计测量电动势(或电压)时,利用标准电动势补偿待测电动势,而使回路中电流为零,可以得到待测电动势的大小。